

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.383>



基于高温超导的瞬变电磁法在青城子矿集区的应用

王兴春^{1,2,3}, 邓晓红^{1,2,3}, 陈晓东^{1,2,3}, 张杰^{1,2,3}, 武军杰^{1,2,3}, 智庆全^{1,2,3}, 杨毅^{1,2,3}

1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000
2. 国家现代地质勘查工程技术研究中心, 河北廊坊 065000
3. 自然资源部地球物理电磁法探测技术重点实验室, 河北廊坊 065000

摘要: 为了提高瞬变电磁法的探测深度, 在青城子矿集区开展了大定源装置条件下基于线圈传感器和高温超导传感器的瞬变电磁法实验工作。结果表明: 利用高温超导传感器直接测量磁场具有低噪声、高灵敏度、低频响应好的特点, 晚期信噪比高且对深部低阻响应敏感的优点。在相同激发条件和低噪声背景条件下, 基于高温超导传感器的瞬变电磁法在青城子矿集区探测深度可达到 1 800 m 左右, 较传统线圈传感器反演深度提高 50%, 该方法能有效地提高瞬变电磁法探测深度。

关键词: 青城子矿集区; 金矿; 高温超导; 瞬变电磁法; 感应磁场; 地球物理。

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2021)05-1871-10

收稿日期: 2020-11-18

Application Effect of TEM Based on High Temperature Superconducting Sensor in Qingchengzi Ore-Concentrated Area

Wang Xingchun^{1,2,3}, Deng Xiaohong^{1,2,3}, Chen Xiaodong^{1,2,3}, Zhang Jie^{1,2,3}, Wu Junjie^{1,2,3}, Zhi Qingquan^{1,2,3}, Yang Yi^{1,2,3}

1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China
2. State Research Center of Modern Geological Exploration Engineering Technology, Langfang 065000, China
3. Key Laboratory of Geophysical Electromagnetic Detection Technology, Ministry of Natural Resources, Langfang 065000, China

Abstract: In order to improve the detection depth of TEM, the TEM experiment based on HTS sensor was carried out in Qingchengzi ore-concentrated area. The results show that the HTS sensor has the advantages of low noise, high sensitivity and good response at low frequency. Under the same excitation condition and low noise background, the detection depth of TEM based on HTS sensor in Qingchengzi ore-concentrated area can reach about 1 800 m, which is 50% higher than that of conventional coil sensor, indicating this method can effectively improve the detection depth of TEM.

Key words: Qingchengzi ore-concentrated area; gold mine; high-temperature superconductivity; transient electromagnetic method; induced magnetic field; geophysics.

磁性源瞬变电磁法作为一种重要的电磁勘探方法, 过去的数十年中在金属矿、地下水、煤田、地热、油气和构造探测中发挥了极其重要的作用, 取

得了明显的经济效益和社会效益(蒋邦远, 1998), 随着新一轮“攻深找盲”找矿工作开展, 深反射地震、重磁反演解释等地球物理方法在深部构造探

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2018YFC06038)。

作者简介: 王兴春(1975-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事瞬变电磁法研究与生产工作。ORCID: 0000-0001-9504-4441。E-mail: wxingchun@mail.cgs.gov.cn

引用格式: 王兴春, 邓晓红, 陈晓东, 等, 2021. 基于高温超导的瞬变电磁法在青城子矿集区的应用. 地球科学, 46(5): 1871-1880.

测、隐伏岩体识别方面发挥了重要作用(刘子龙等, 2019; 朱丹等, 2019), 如何有效提高瞬变电磁的探测深度是急需解决的问题。

在瞬变电磁探测深度方面, 国内外相关学者做了大量的探讨和实验工作(Lee *et al.*, 2002; Koch *et al.*, 2003; 王庆乙, 2007; 荣亮亮等, 2016; 陈明生和石显新, 2017)。通常有 2 种途径提高探测深度, 其一是加大常规磁性源瞬变电磁发射磁矩 IS (I 为发射电流, S 为发射线圈面积), 通过激励更强的二次场, 提高晚期信噪比, 从而提高深度(徐剑波, 2014); 其二是采用磁通门和高、低温超导传感器直接测量磁场, 利用磁场传感器晚期灵敏度高、低频响应好的特点有效提高探测深度(Nabighian *et al.*, 2005; Asten and Duncan, 2012; Ji *et al.*, 2016)。其中 Asten and Duncan (2012) 比较了低阻盖层和低阻围岩条件下测量磁场和感应电动势的区别, 阐述了测量磁场感应时间提前、可穿透低阻盖层等八大优点, 尤其测量磁场有利于发现深部良导矿体, 这对开展深部找矿工作具有实际意义。

通过测量磁场提高磁性源瞬变电磁探测深度已成主要趋势, 国外早在 20 世纪 70 年代就开始开展相关研究工作, 提出了如何在瞬变电磁测量中运用高温超导传感器有效提高灵敏度、提高信号晚期信噪比的方法, 指出了瞬变电磁法中测量磁场的诸多优点并进行了理论分析和实验(Smith and Annan, 1998; Woods, 2010; Yang and Oldenburg, 2012; Chwala *et al.*, 2015)。实用化方面, 日本、德国等相继将基于高、低温超导传感器的瞬变电磁法用于火山监测、地热调查及深部找矿等方面(Foley *et al.*, 2006; Arai *et al.*, 2007; Yoshimatsu *et al.*, 2019), 并开始逐步商品化生产和应用推广。由澳大利亚 EMIT 公司生产的瞬变电磁系统 SMART-em24, 标配磁通门传感器, 可见国外瞬变电磁法测量磁场已经从理论研究向商品化实用化方向迈进。

自 20 世纪 90 年代以来, 国内有许多学者从理论上就其优势进行理论研究和试验工作。苏朱刘等(2004)指出感应电动势和磁场所对应的二次场随时间的衰减规律并不相同, 感应电动势 dB/dt 是以 $t^{-5/2}$ 衰减的, 而磁场 B 是以 $t^{-3/2}$ 衰减, 即 dB/dt 比 B 衰减的快, 因此测量磁场能在晚期获得更高信噪比的信号, 对提高深部探测能力具有实际意义, 尤其 B 对深部低阻的响应能力较 dB/dt 强, 有利于发现深度低阻介质(戴远东和王世光, 1996; 苏朱刘等, 2004); 朱子青等(2020)研究了非屏蔽环境中高温超

导传感器的移动测量过程中失锁、灵敏度下降的问题, 并探讨了具体解决方案; 在传感器研制和实用化方面, 物化探所陈晓东等(2012)采用物化探所自行研制的高温超导传感器结合加拿大 Crone 公司的 PEM 系统, 采用中心回线装置, 将探测深度从 800 m 提升至 1 200 m(陈晓东等, 2012; 王兴春等, 2014)。

综上所述, 尽管国内高温超导研究起步较晚, 但研究人员已经从理论和实用化方面积极地开展了探索和研究, 实用化方面也取得了一定进步, 基于高温超导的瞬变电磁法结合中心回线装置有效地提高了探测深度, 但将其与大发射磁矩的大定源回线装置相结合, 能否进一步提高探测深度是本文研究的目标。

1 基于高温超导的瞬变电磁法

高温超导干涉器(high temperature superconducting quantum interference device, 简称 HTc SQUID) 是一种利用超导宏观量子干涉效应工作的磁场测量器件, 由探头、低噪声高频前置放大器、控制电路等组成, 外磁场通过超导环时, 加载于超导环耦合线圈上的射频信号被调制, 被调制的信号经放大器放大后送入混频器检波, 经积分器积分后, 得到一个与磁通变化量成比例关系的电压值, 这个电压值经过电阻反馈到与超导环耦合的线圈上, 在超导环内产生一个与外磁通变化量大小相等、方向相反的磁场, 这样使超导环内的磁通变化为零。积分器输出的这个电压值就反映了通过超导环的磁通变化量的大小, 经过标定, 就可对应得到磁场值(陈晓东等, 2006)。

高温超导瞬变电磁是利用高温超导量子干涉器在液氮温区(77 K)直接测量磁场, 利用高温超导传感器接收到更晚期信号从而有效提高探测深度的一种方法。HTc SQUID 是一种灵敏度极高(fT 量级)的直接测量磁场的传感器, 频带宽(>10 MHz)且频带内灵敏度不随频率变化, 是理想的瞬变电磁接收传感器。HTc SQUID 由于致冷简易, 重量轻, 充灌便利, 得到了广泛的应用; 低温超导是相对高温超导而言, 两者都是利用超导量子干涉器的特点测量磁场, 但低温超导传感器在 4.2 K 液氮温区条件下测量磁场, 与高温超导相比, 具有噪声低、灵敏度高、频带宽且宽频带内响应线性等特点, 但低温超导传感器成本相对较高, 设备体积较大、技术复杂, 难以适用复杂地形条件下的数据采集工作, 进而影响其进一步推广应用。

2 工作区地质及地球物理特征

青城子矿集区位于辽吉裂谷带中部,该裂谷带又称辽东裂谷,是在太古宙华北克拉通基底上发育起来的,经拉张裂解—快速沉降—挤压回返过程而形成,太古界鞍山群变质岩构成裂谷基底,其上为不整合覆盖的辽河群,近东西走向,由下至上依次为浪山子组、里尔峪组、高家峪组、大石桥组和盖县组(王玉往等,2017).其中盖县组、大石桥组在本区内广泛分布,也是本次实验研究的主要对象(图1).

盖县组(Pt_g):在区内分布广泛,岩性以黑云母片岩为主,是区内金、银的主要赋矿层位.其底部与大石桥组断层接触,接触带发育黑云变粒岩、透闪变粒岩,在盖县组与大石桥组的接触部位有大量金矿分布;统计分析矿集区物性测量资料,盖县组整体上表现为相对高阻.

大石桥组(Pt_d):大石桥组分上中下三层,其中上层由厚层状透辉透闪片岩和硅质条带状大理岩互层组成,在整个测区中属于中低阻;中部由薄层含石墨大理岩和硅质条带大理岩组成,表现为

明显的低阻特征;下部层由厚层—巨厚层中粒大理岩和白云石大理岩组成,局部夹斜长角闪片岩,在电性上表现为高阻.

根据物性测量结果(表1),可见透辉透闪片岩、含石墨大理岩和黄铁矿化大理岩,明显表现为低阻,而矽线石黑云母片岩、黑云母片岩、黑云母变粒岩及白云大理岩硅钾蚀变岩明显地表现为高电阻率特征.

区内断裂构造以北东向为主,主要有于上沟断裂、尖山子断裂、大磨岭断裂等,其中尖山子断裂控制着白云、林家三道沟、小佟家堡子等一系列金银矿床的分布,断裂总体走向为 335° ,倾向北东,倾角为 $60^\circ\sim 80^\circ$,宽度为 $10\sim 20\text{ m}$,是本次重点研究对象之一.

前人在该矿集区开展了大量的基础研究工作,基本查明了矿集区内的主要矿床地质特征、控矿构造和找矿标志等(曾庆栋等,2019),但这项工作仅限于地表填图和部分钻孔揭示的一定深度范围内的信息,钻孔一般深度小于 $1\ 000\text{ m}$,个别孔深度相对较大,但一孔之见很难反映复杂的矿区地质构造变化.



图1 青城子矿集区地质简图

Fig.1 Sketch geological map of Qingchengzi ore-concentrated area
据辽宁省地质矿产调查院,2001. 1:5万区域地质调查报告(青城子镇幅)修改

表 1 青城子矿集区岩(矿)石电性参数统计

Table 1 Statistic of electrical parameters for rock (ore) in Qingchengzi ore-concentrated area

岩性	样本数	电阻率($\Omega \cdot m$)		
		最小值	最大值	平均值
白云大理岩	43	3 630.7	26 196.7	11 466.9
变粒岩	34	308.6	20 827.7	5 163.5
砂线石云母片岩	21	5 392.1	13 786.1	4 635.5
黄铁矿化大理岩	30	367	1 816	669
黑云母片岩	30	4 003	8 091	5 974
斑状花岗岩	26	728.2	13 654.8	7 020.8
黑云变粒岩	9	2 008.8	8 095.5	5 428.6
含石墨大理岩	30	87	314	227
透辉透闪片岩	30	286	1 693	702

3 高温超导瞬变电磁数据采集及成果分析

为了查明白云、小佟家堡子一带深部岩体、断裂等地质要素,在白云矿区、小佟家堡子矿区及外围共布置南北向、北西向瞬变电磁测线 23 条,本文选择其中具有代表性的 2 条测线进行分析,涉及的测线有小佟家堡子 X1 线、白云矿区 L15 线南框。

X1 测线自南向北依次横跨盖县组、第四系和大石桥组,瞬变电磁测线在 9500 点后进入大石桥组,在 7100、10250 点分别跨过两个条带状斜长花岗岩岩体,在 6950 点与尖山子断裂斜交。X1 测线采用中心回线和定源回线装置进行采集,南侧 4400~6100 号测点采用中心回线装置,点距为 100 m,发射框为 200 m×200 m,发射电流为 15 A,时基为 20 ms;6100 点以北

采用定源回线装置,点距为 50 m,发射框大小为 400 m×900 m 或 400 m×1 000 m,发射电流为 18~22 A,时基为 50 ms,采用主剖面测量。两种装置均采用超导和线圈传感器同时采集,以便后期进行对比分析。L15 线采用 400 m×900 m 定源回线装置,点距为 50 m,在主剖面上 2 种传感器同时采集。

瞬变电磁仪采用加拿大 Crone 公司 PEM 系统,传感器采用 PEM 系统自带的线圈和物化探所自行研制的高温超导传感器;高温超导传感器基本参数如下:带宽为 20 kHz,噪声 $80 \text{ ft}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ kHz}$,摆率为 0.6 mT/s。

3.1 衰减曲线比较

为了说明超导传感器测量磁场的优越性,选用 X1 线 7100 点数据进行单点衰减曲线比较分析,显示超导磁场信号晚期高信噪比的特点。

图 2 为小佟家堡子 X1 测线 7100 点线圈(a)和高温超导(b)对应的衰减曲线,可见感应电动势和磁场衰减曲线早期相对光滑,数据质量较高,但在晚期感应电动势在 CH30~CH36 之间出现了明显的跳动,感应电动势衰减曲线远不及磁场稳定。根据前期噪声测量,该区域感应电动势和磁场的晚期噪声水平分别为 8 nT/s 和 4 pT 左右,而图中感应电动势在 8 nT/s 以下仍有 6 个采样时窗,尽管可通过数字滤波等方法使曲线圆滑,但其本质是噪声水平以下的叠加平均,不具有实际意义,在反演过程中应该予以剔除。观察右侧高温超导衰减曲线可见,其晚期曲线光滑,曲线衰减形态正常,末道(CH36)的响应为 27.3 pT,远高于 4 pT 的噪声水平,表明该值可信,在反演计算中应充分利用。

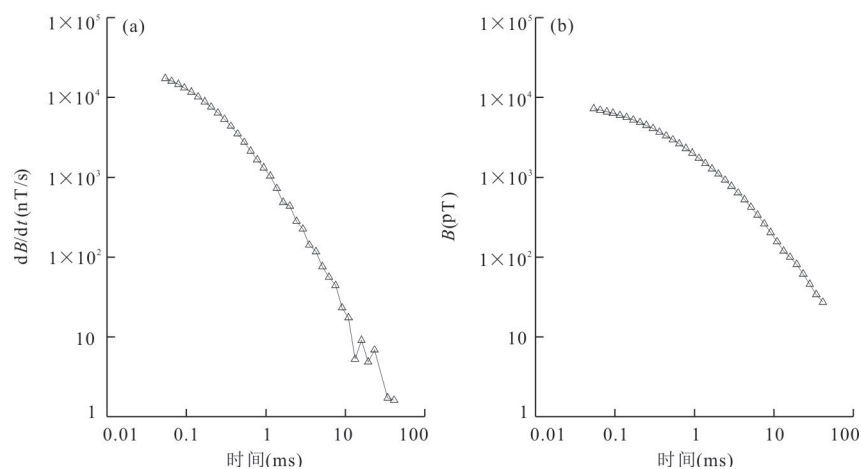


图 2 同点感应电动势衰减曲线(a)和高温超导磁场衰减曲线(b)

Fig.2 Decay curves of coil (a) and HTc SQUID (b) for same station

比较两者发现感应电动势晚期响应的稳定性远低于高温超导传感器的晚期响应结果,其结果必然使高温超导数据反演深度增大.

3.2 单框剖面比较

此处以 X1 线中的单框 Loop4 和 L15 线南框数据为例,从剖面曲线和电阻率反演断面两方面进行对比.本文通过比较剖面曲线晚期噪声变化情况说明磁场测量的优越性,剖面上各点的噪声水平不尽相同,选取典型测点进行比较.

反演解释采用目前最新的 Maxwell 商业化软件,通过收集测区电阻率测深、测井资料构建初始模型,调用第三方模块 CSIRO 中的子模 Beowulf 块进行一维反演成像. Maxwell 是一款由澳大利亚 EMIT 公司推出的商业化瞬变电磁法处理解释软件,由 Maxwell 基础模块、Emax 成图模块及 CSIRO 正反演模块三部分组成,该软件可视化和交互功能强大,是目前国际上最新的专业瞬变电磁软件之一. Maxwell 基础模块主要包括数据的预处理、坐标转换、头文件参数修正等功能,目前支持国际上主流瞬变电磁仪器 (PROTEM、PEM、SM24 等)的

数据预处理和反演解释; Emax 模块则主要用于面积或剖面网格化成图,支持定源回线、中心回线、重叠回线和偶极装置的数据处理和拟断面成图; CSIRO 正反演模块主要以澳大利亚联邦科学与工业研究院关于瞬变电磁法正反演研究成果为主, EMIT 公司后期进行了一定程度的改进,该模块由 14 个子模块组成, CSIRO 正反演模块目前支持时间域和频率域的地面和地井装置的三维正演计算,支持地面 TEM 一维反演及航空 TEM 的二维反演. Beowulf 模块作为 CSIRO 中的子模块,目前最新版本为 2007 年发布的 1.0.3 版本,它支持时间域和频率域条件下大部分装置的 B_z 、 dB/dt 数据的一维层状模型反演解释,兼容性好,是 Maxwell 中主要的反演计算模块之一 (Raiche, 2008).

图 3 中为线圈和超导传感器所对应的 X1 线单框 (Loop4) 剖面曲线,在 CH32 采样时窗 (红色) 之后,感应电动势基本进入噪声水平 (不同测点由于干扰源的不同导致噪声水平有差异),而相应的磁场响应在 CH32 采样时窗之后依然与前面时窗变化趋势一致;以 8900 点为例,在 CH32 时窗感应电动势为

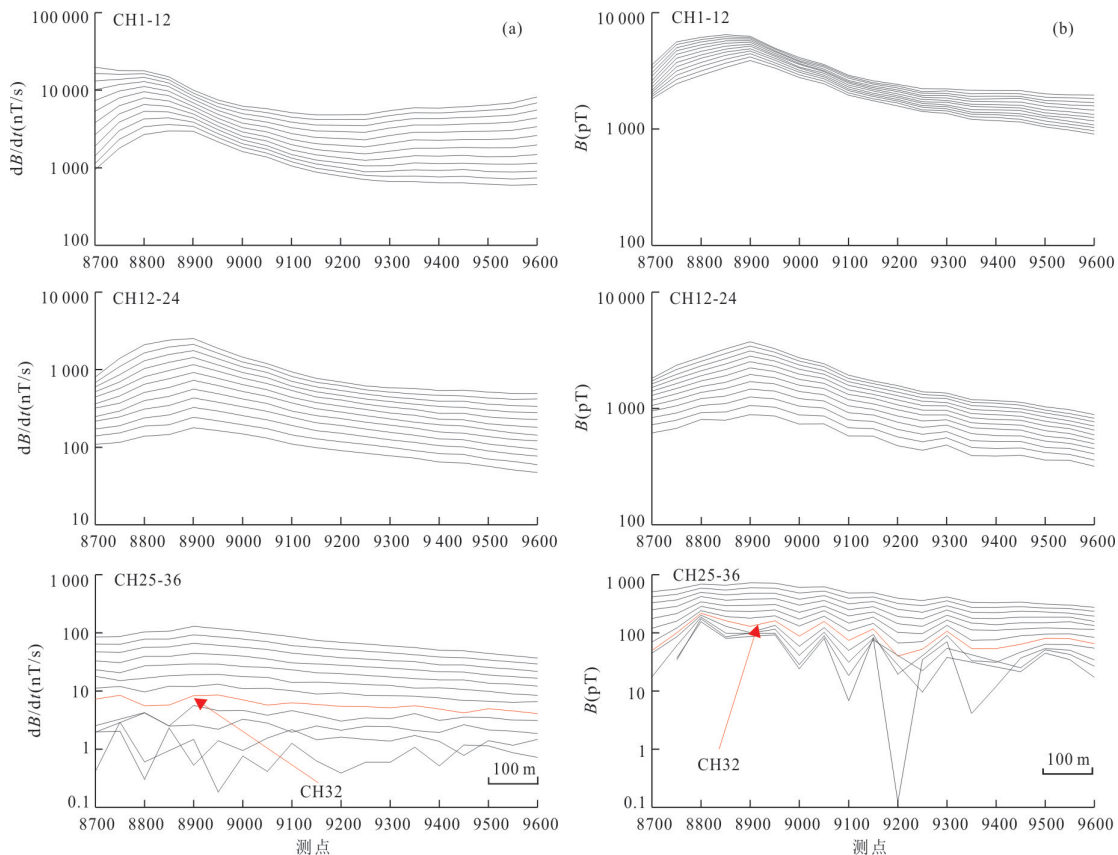


图 3 Loop4 感应电动势剖面曲线 (a) 和磁场剖面曲线 (b)

Fig.3 Profile for inductive EMF (a) and profile for B_z (b)

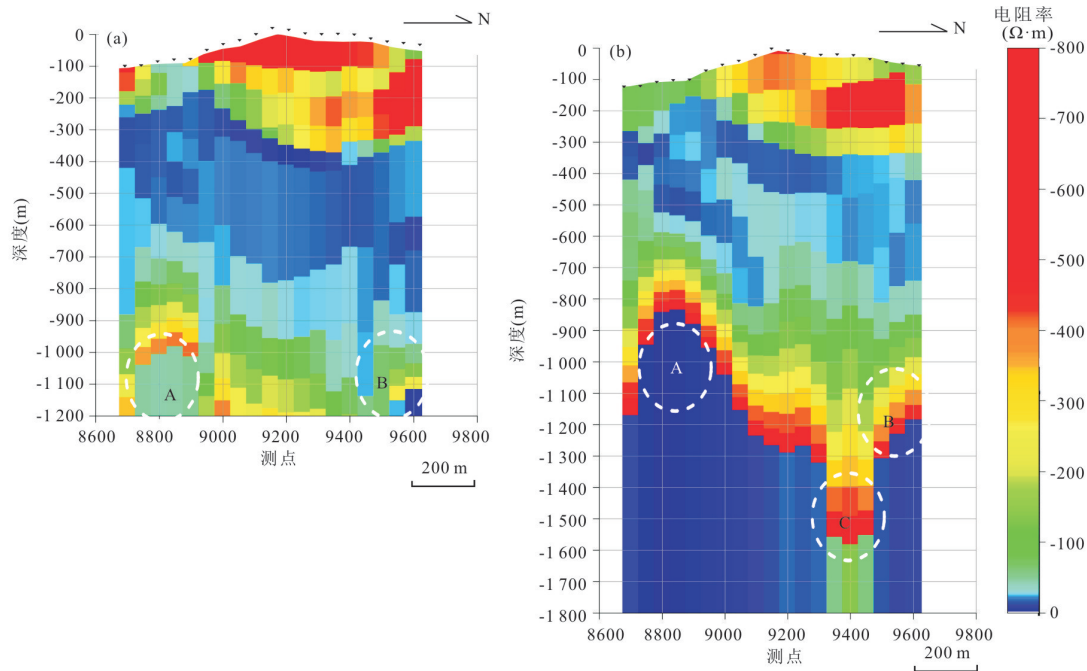


图4 Loop4感应电动势(a)和磁场(b)电阻率反演断面图

Fig.4 Resistivity inversion sections for induced voltage (a) and B_z (b) for Loop4

8.29 nT/s, 高异常特征不再明显, 相应的磁场的响应值为 129.72 pT, 明显高于背景响应水平 (10 pT), 这种磁场响应在晚期高异常明显优于感应电动势的现象 Asten and Duncan (2012) 已做了专门研究, 通过测量磁场晚期高异常特征往往能发现深部大规模的良好导体。

图 4 为图 3 所对应的一维电阻率反演断面图, 断面上都存在两个低阻区, 第一低阻区在剖面上呈带状分布, 以 8900 点为最高点逐渐向北倾斜, 厚度为 150~500 m, 在两个剖面上形态基本类似, 但感应电动势反演剖面上浅部信息更丰富; 第二低阻层在 -850 m 以下, 在 8900 附近是其最高点, 向两边倾斜, 其中在 9400 处被高阻体分割为南北两部分。如图 4 所示 A 区域在线圈和超导反演剖面中都有显示, 但在电动势反演断面中不明显, 磁场反演断面进一步确定了该低阻体的存在, 且表明其产状具有北倾特征, B 区域在线圈反演剖面上只有少许出露, 而在磁场反演剖面上反映明显, C 区域是夹在低阻中的高阻体, 在感应电动势反演剖面上难以探测到该深度, 故无显示。两个剖面在很大程度上反映了浅部低阻和深部低阻的分布状态, 且吻合程度较好, 个别细节上有出入可能与不同传感器的特性有关。

图 5 是白云金矿西侧 L15 线南框不同传感器的剖面曲线的对比, 由图可见, 1200 点之后晚期噪声增大, 线圈传感器在 CH31 之后响应已进入噪声

水平 (4 nT/s), 而高温超导传感器的响应则在 CH34 采样道 (绿色) 才逐渐进入噪声水平 (20 pT), 由线圈剖面曲线可见在 1300~1600 晚期干扰明显增大 (附近存在通信基站), 但在此区间高温超导响应受干扰程度明显较小, 这表明磁场晚期敏感程度更高, 有利于发现深部低阻介质。

图 6 为图 5 所对应的电阻率反演剖面图, 左右两侧分别为电动势、磁场数据反演剖面。在 -300 m 以下两者都有一南倾的带状低阻, 且在 1400~1600 点, 磁场剖面在 -1300 m (图中 A 区域) 以下出现了低阻, 该低阻在线圈反演剖面上并未揭示。

反演过程中根据不同传感器响应特征, 剔除的时窗数并不相同。此处电动势响应剔除 5 个时窗而磁场响应为 2 个, 线圈反演深度为 1200 m, 而高温超导反演深度为 1800 m, 探测深度提高了 50%, 两者在 1200 m 深度范围内高低阻分布形态对应关系较好, 且线圈在浅部的分层能力明显优于高温超导, 但在深部分层能力磁场相对更强, 信息更可靠。

本文分析 X1 线 Loop4 及 L15 线南框剖面曲线可见, 在晚期, 不同范围都存在干扰引起的曲线跳动, 相同条件下, 磁场剖面曲线明显相对连续、平稳, 整体数据质量优于线圈剖面曲线, 磁场响应在晚期信噪比更高; 高温超导传感器在探测深度上优势明显, 且深部分层能力强。在相同激发条件下, 当

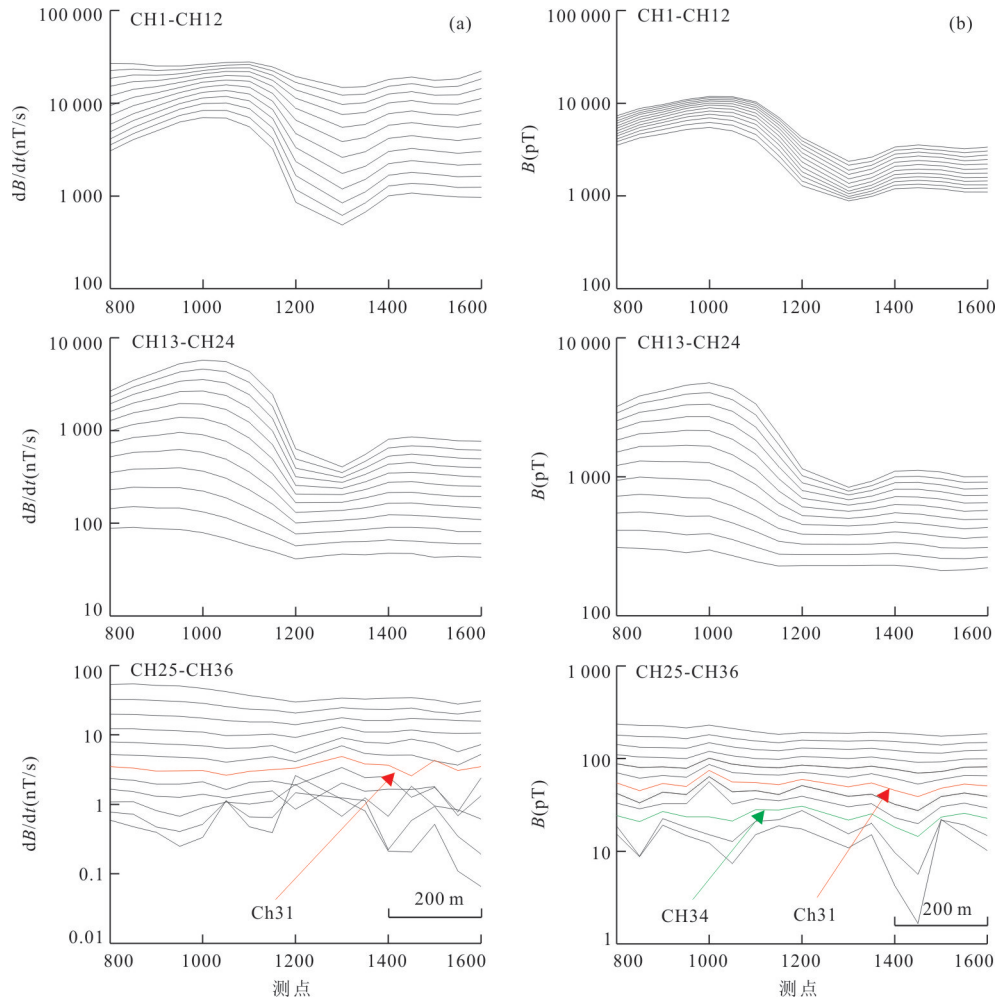


图 5 L15 线感应电动势剖面曲线(a)和磁场剖面曲线(b)

Fig.5 Inductive EMF profile (a) and B_z profile (b) for L15

外界干扰较小时,基于高温超导传感器的瞬变电磁法在青城子矿集区探测深度可达 1 800 m 左右,较传统瞬变电磁探测深度提高 50% 左右.

3.3 剖面反演及解释

图 7 为小佟家堡子南北向 X1 剖面对应的电阻率反演断面图,反演断面探测深度各有不同,这是由于装置不同和各测点干扰差异所致.剖面南侧 4400~6100 点采用中心回线装置,其探测深度必然小于 6100 点以北的定源回线探测深度,而 6100 点以北剖面探测深度不一致,是由于部分测点受高压输电线路、地下生产巷道等因素造成晚期数据信噪比下降,从而导致探测深度存在差异.

结合测线位置及各地层岩性电性特征,笔者对电阻率反演断面开展地质解释,如图 7 所示,在 6950 点左右测线与尖山子断裂斜交,且在 6950 点电性断面上出现明显北倾的高低阻分界面,推测为尖山子断裂的反映.同时在 6950、10150 点分别横跨过斜长

花岗岩体,可见在 6950 点、10150 点附近电阻率反演断面明显的高阻响应特点,这是高阻岩体的反映,与表 1 中斑状花岗岩高阻的特征相吻合.

结合小佟家堡子—林家三道沟—马隈子一带地层叠置关系和地质构造特征,推测在 4400~5800 点浅部相对高阻层为盖县组,下面高阻层为大石桥组三段地层,中间低阻层为两组地层接触带;5800~6850 浅部低阻层为盖县组二段地层,电性上表现为偏低阻特征;6950 点以北的浅部横向的高、低阻层推测为大石桥组,电阻率断面大致反映了一 50 m 以深的电性分布特征,推测该区域表层盖县组由于剥蚀作用而缺失,根据大石桥组各段的地层岩性特征,推断 6950 点以北深部的低阻层为大石桥二段地层.

根据前人研究成果,尖山子断裂总体走向为 335°,局部近南北,倾向北东,倾角为 60°~80°(赵睿, 2013;王一存等, 2015),而正南北向瞬变电磁测线 X1 与之夹角为 25°,非垂直于尖山子断裂,根据瞬变电

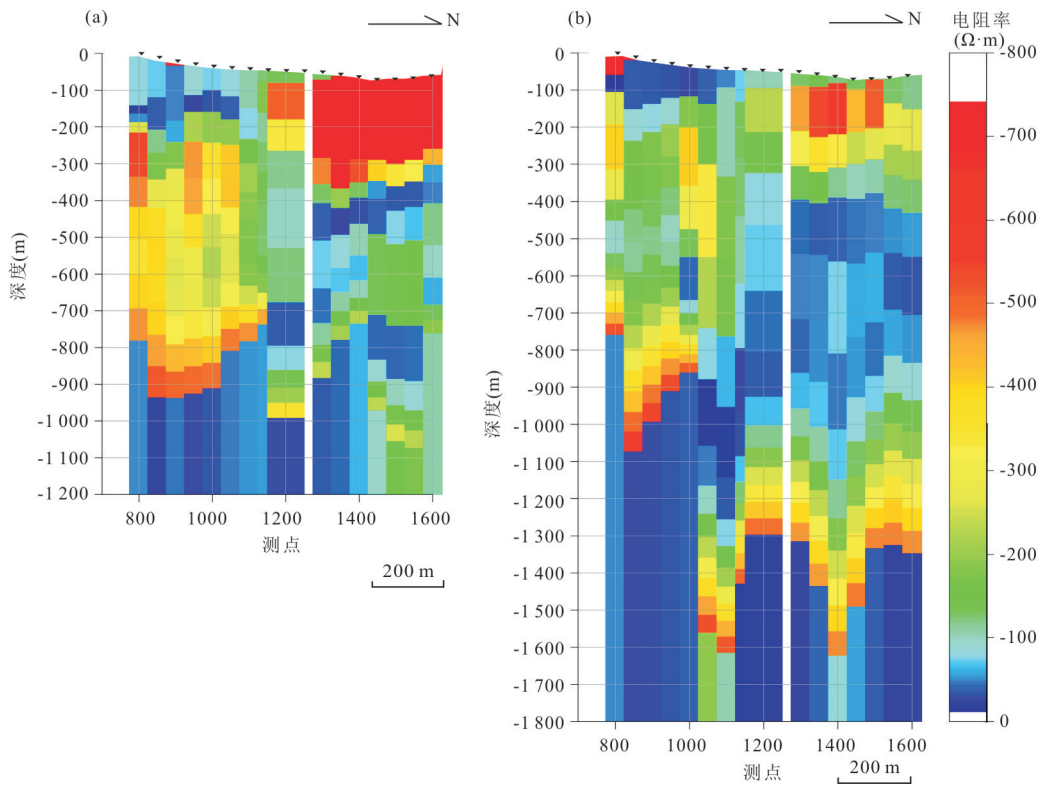


图 6 L15线感应电动势(a)和磁场(b)电阻率反演断面图

Fig.6 Resistivity inversion sections of induced voltage (a) and B (b) for L15

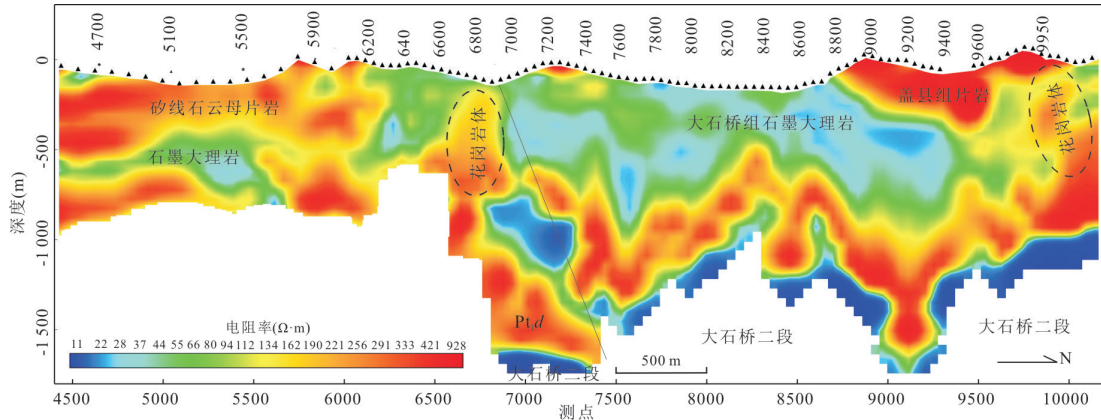


图 7 小佟家堡子瞬变电磁 X1 线电阻率反演断面图

Fig. 7 TEM resistivity inversion section for X1 line in Xiaotongjiapuzi

磁结果可见,电阻率反演断面与已知尖山子断裂的位置和断层面产状对应程度较高,高阻体与两处岩体的位置相吻合;根据反演结果,在 8950~10000 点范围内,1 800 m 左右存在明显的低阻,根据地层岩性电阻率特征,推测深部低阻为大石桥二段。

4 结论

本文通过在青城子矿集区开展基于高温超导

传感器和线圈传感器的瞬变电磁法对比实验工作,结果表明采用高温超导传感器测量磁场具有衰减速度慢,晚期数据信噪比高的特点;相同噪声背景条件下,测量磁场抗干扰能力明显优于测量电动势,这为提高探测深度提供了可能;相对于以往中心回线装置结合高温超导传感器测量,采用大定源回线装置结合高温超导传感器探测深度明显提高。

(1)基于高温超导传感器的瞬变电磁法能有效地提高探测深度,在青城子矿集区,当干扰较小且在现

有发射条件下,利用高温超导传感器测量磁场将探测深度提高至1 800 m,较线圈传感器提高了50%。

(2)结合已有地质资料和高温超导瞬变电磁反演断面,瞬变电磁电阻率反演断面从平面和空间上反映了尖山子断裂的平面位置和产状特征,两者吻合程度较高。

基于高温超导传感器的瞬变电磁法填补了国内在该领域的空白,为瞬变电磁法在新一轮“攻深找盲”工作中发挥优势奠定了基础。

References

- Arai, E., Hart, J., Katamama, H., 2007. Application of a New TEM Data Acquisition System Based on a HTS SQUID Magnetometer (SQUITTEM) to Metal Exploration in Broken Hill Area. *ASEG Extended Abstracts*, (1): 1—5.
- Asten, M. W., Duncan, A. C., 2012. The Quantitative Advantages of Using B-Field Sensors in Time-Domain EM Measurement for Mineral Exploration and Unexploded Ordnance Search. *Geophysics*, 77(4):137—148. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0385.1>
- Chen, M.S., Shi, X.X., 2017. Detecting Depth of Transient Electromagnetic Method from Different Points of View. *Coal Geology & Exploration*, 45(5): 140—146 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X.D., Zhao, Y., Deng, X.H., et al., 2006. The Development of the HTS Rf Squid Magnetometer and Its Application to TEM. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 30(3): 229—232 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X.D., Zhao, Y., Zhang, J., et al., 2012. The Applications of HTc SQUID Magnetometer to TEM. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(2):702—708 (in Chinese with English abstract).
- Chwala, A., Stolz, R., Schmelz, M., et al., 2015. SQUID Systems for Geophysical Time Domain Electromagnetics (TEM) at IPHT Jena. *IEICE Transactions on Electronics*, E98C (3): 167—173.
- Dai, Y.D., Wang, S.G., 1996. Comparison between High T_c Squid Sensor and Conventional Inductive Sensor in Transient Magnetolectric Method for Magnetolectric Sounding. *Chinese Journal of Low Temperature Physics*, 18(1):11—19 (in Chinese with English abstract).
- Foley, C. P., Leslie, K. E., Binks, R. A., 2006. A History of the CSIRO's Development of High Temperature Superconducting Rf Squids for TEM Prospecting. *ASEG Extended Abstracts*, (1): 1—5. <https://doi.org/10.1071/aseg2006ab094>
- Ji, Y.J., Du, S.Y., Xie, L.J., et al., 2016. TEM Measurement in a Low Resistivity Overburden Performed by Using Low Temperature SQUID. *Journal of Applied Geophysics*, 135: 243—248. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.09.027>
- Jiang, B. Y., 1998. Application of Near-Field Magnetic Source Transient Electromagnetic Exploration. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Koch, R., Clarke, J., Martinis, J., et al., 2003. Investigation of 1/f Noise in Tunnel Junction dc Squids. *IEEE Transactions on Magnetics*, 19(3): 449—452.
- Lee, B., Dart, D. L., Turner, R. J., et al., 2002. Airborne TEM Surveying with a SQUID Magnetometer Sensor. *Geophysics*, 67(2):468—477. <https://doi.org/10.1190/1.1468606>
- Li, J.H., 2005. Study on Ore-Forming Conditions and Mineral Resource Assessment of Lead-Zinc-Silver-Gold Metallogenic Belt in Qingchenzi, Liaoning Province (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.L., Lu, Z.W., Jia, J. L., et al., 2019. Using Deep Seismic Reflection to Profile Deep Structure of Ore Concentrated Area: Current Status and Case Histories. *Earth Science*, 44(6): 2084—2105 (in Chinese with English abstract).
- Nabighian, M.N., Grauch, V. J. S., Hansen, R.O., et al., 2005. The Historical Development of the Magnetic Method in Exploration. *Geophysics*, 70(6): 33ND.
- Raiche, A., 2008. The P223 Software Suite for Planning and Interpreting EM Surveys. *Preview*, 2008:25—30.
- Rong, L.L., Jiang, K., Pei, Y.F., et al., 2016. Low-T_c SQUID Sensor for Time Domain Electromagnetic Prospecting. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 37(12): 2671—2677 (in Chinese with English abstract).
- Smith, R., Annan, P., 1998. The Use of B-Field Measurements in an Airborne Time-Domain System: Part I. Benefits of B-Field versus dB/dt Data. *Exploration Geophysics*, 29(2): 24—29. <https://doi.org/10.1071/EG998024>
- Su, Z.L., Zhang, J.D., Hu, W.B., 2004. On Directive Measurement and Characteristic Analysis of Magnetic Field for Transient Electromagnetic Method (TEM). *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 1(1): 70—73 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q.Y., 2007. Querying the Depth Formula of TEMS. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 31(4):327—332 (In Chinese with English abstract).
- Wang, X.C., Zhang, J., Zheng, X.P., et al., 2014. Applica-

- tion of Fluxgate Sensor in TEM Prospecting. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 36(6):649–654 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.C., Wang, K.Y., Zhang, M., et al., 2015. Characteristics of Hydrothermal Superposition Mineralization and Fluid Origins of the Xiaotongjiapuzi Gold Deposit in Liaoning Province. *Geology and Exploration*, 51(1): 79–87.
- Wang, Y.W., Xie, H. J., Li, D.D., et al., 2017. Prospecting Prediction of Ore Concentration Area Exemplified by Qingchengzi Pb-Zn-Au-Ag Ore Concentration Area, Eastern Liaoning Province. *Mineral Deposits*, 36(1):1–24 (in Chinese with English abstract).
- Woods, D., 2010. Transient Electromagnetic Survey Optimization Using SQUID Sensors. SEG Technical Program Expanded Abstracts, Denver.
- Xu, J.B., 2014. The Study and Application of Transient Electromagnetic Sounding on the Theoretical Depth of Investigation (Dissertation). East China University of Technology, Nanchang (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. K., Oldenburg, W., 2012. Three-Dimensional Inversion of SQUID TEM Data at Lalor Lake VMS Deposit. SEG Las Vegas Annual Meeting, Las Vegas.
- Yoshimatsu, K., Tsuzuki, M., Mori, T., et al., 2019. Developing a SQUITEM System for the Geothermal Exploration in JOGMEC. The 13th SEGJ International Symposium, Tokyo.
- Zeng, Q.D., Chen, R.Y., Yang, J.H., et al., 2019. The Metallogenic Characteristics and Exploring Ore Potential of the Gold Deposits in Eastern Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 35(7):1939–1963 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, R., 2013. Research on Metallization of Xiaotongjiabuzi Gold Deposit in Eastern Liaoning Province (Dissertation). Northeastern University, Shenyang (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D., Liu, T.Y., Yang, Y. S., et al., 2019. Geophysical Interpretation of Rock-Controlling Structure and Concealed Rock Mass Features in Southeast Hubei Province. *Earth Science*, 44(2): 640–651 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z.Q., Xu, T.Q., Li, J.F., et al., 2020. Research on Mobile Measurement of HTc SQUID Magnetometer in Unshielded Environment. *Cryogenics & Superconductivity*, 48(9):1–7 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈明生, 石显新, 2017. 对瞬变电磁测深几个问题的思考(四)——从不同角度看瞬变电磁场法的探测深度. *煤田地质与勘探*, 45(5):140–146.
- 陈晓东, 赵毅, 邓晓红, 等, 2006. 高温超导磁强计研制及在瞬变电磁法中的应用. *物探与化探*, 30(3):229–232.
- 陈晓东, 赵毅, 张杰, 等, 2012. 高温超导磁强计在瞬变电磁法中的应用研究. *地球物理学报*, 55(2):702–708.
- 戴远东, 王世光, 1996. 在瞬变电磁法大地电磁测量中高 Tc SQUID 探头与常规探头的比较. *低温物理学报*, 18(1): 11–19.
- 蒋邦远, 1998. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探. 北京: 地质出版社.
- 李基宏, 2005. 辽宁青城子铅锌银金矿集区成矿条件与成矿预测(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 刘子龙, 卢占武, 贾君莲, 等, 2019. 利用深地震反射剖面开展矿集区深部结构的探测: 现状与实例. *地球科学*, 44(6): 2084–2105.
- 荣亮亮, 蒋坤, 裴易峰, 等, 2016. 适用于瞬变电磁勘探的低温超导磁传感器. *仪器仪表学报*, 37(12): 2671–2677.
- 苏朱刘, 张交东, 胡文宝, 2004. 瞬变电磁法中磁场的特性及测量方法. *工程地球物理学报*, 1(1): 70–73.
- 王庆乙, 2007. 对瞬变电磁法回线边长决定探测深度的质疑. *物探与化探*, 31(4):327–332.
- 王兴春, 张杰, 郑学萍, 等, 2014. 磁通门探头在瞬变电磁报表明磁法勘探中的应用. *物探化探计算技术*, 36(6): 649–654.
- 王一存, 王可勇, 张森, 等, 2015. 辽宁小佟家堡子金矿床成矿流体特征及来源讨论. *地质与勘探*, 51(1): 79–87.
- 王玉往, 解洪晶, 李德东, 等, 2017. 矿集区找矿预测研究——以辽东青城子铅锌—金—银矿集区为例. *矿床地质*, 36(1):1–24.
- 徐剑波, 2014. 瞬变电磁法理论探测深度的研究及应用(硕士学位论文). 南昌: 东华理工大学.
- 曾庆栋, 陈仁义, 杨进辉, 等, 2019. 辽东地区金矿床类型、成矿特征及找矿潜力. *岩石学报*, 35(7): 1939–1963.
- 赵睿, 2013. 辽东小佟家堡子金矿床成矿作用研究(硕士学位论文). 沈阳: 东北大学.
- 朱丹, 刘天佑, 杨宇山, 等, 2019. 鄂东南地区控岩构造及隐伏岩体特征的地球物理解释. *地球科学*, 44(2): 640–651.
- 朱子青, 徐铁权, 李军峰, 等, 2020. Ht_c Squid 磁强计在非屏蔽环境中的移动测量研究. *低温与超导*, 48(9):1–7.